

Családi ház termikus modellezése dinamikus szimulációval

Dr. Kassai Miklós PhD¹

Abstract

In the first part of this research work, the different heat dissipation and heat extraction methods of the most frequently used heating systems applied in a single family house are presented. The most common used modern heating technics are modeled in this research: the condensing gas boiler, the air-source heat pump, the radiators and the different floor heating systems. One of the most important parts of this work was the comparison of different calculation procedures. The TRNSYS 18 simulation tool makes use of dynamic simulation, while the WinWatt software calculates according to the Hungarian building energy decree (Decree No. 7/2006). As the continuation of research this research, energetic investigations will be performed and comparative evaluation analysis of the applied methods.

1. Bevezetés

Magyarország energiafelhasználásának közel 40%-át a lakosság, illetve a lakosság által használt épületek (lakóépületek) energiafelhasználása adja. Ez az arány az Európai Unió tagállamaiban is hasonló. Az épületek energiafelhasználása két-féle módon határozható meg. A meglévő épületek esetén a tényleges fogyasztási adatok méréssel pontosan meghatározhatók. A 2002/91/EK irányelv alapján a tervezés fázisában is meg kell tudni határozni az épület várható éves energiafelhasználását [1]. A kutatási téma aktualitását mutatja, hogy a jelenleg rendelkezésre álló szakirodalmi számítási módszerek és adatok csupán a lakóépületek energiafelhasználásának hozzávetőleges becslését teszik lehetővé [2-5].

Nincsenek pontos, egyértelmű módszerek. Az energetikai számításokat végző szimulációs programok elengedhetetlenül fontos támogatást nyújtanak az épületgépész tervező mérnökök számára az épület energiafelhasználásának csökkentése érdekében. Manapság a tervezőknek szükségük van olyan eszközökre, amelyek egyedi kérdések megválaszolásában segítséget adnak már a tervezőmunka kezdeti fázisában is. Így az energetikai számításokat végző szimulációs programok használatával a tervezők könnyebben tudnak döntést hozni a méretezési kérdésekben is (pl. fűtés, hűtés). A tervezők megvizsgálhatják az épület hőtechnikai tulajdonságait a kivitelezés előtt, szimulációs eljárással meghatározhatják a meglévő épületek energiafelhasználását a jelenlegi állapotukban és javaslatot adhatnak a leghatékonyabb energetikai felújításhoz [6-7].

A témában elérhető hazai és nemzetközi irodalom, a vonatkozó rendeletek és kutatási eredmények tanulmányozását alapul véve különösen fontosnak tartom olyan szimulációs modellek kidolgozását, amelyek alkalmazása az épületeknek a jelenleg gyakorlatban alkalmazott analitikai módszerekhez képest jóval pontosabb, a valóságot jobban megközelítő energetikai vizsgálatát teszi lehetővé.

A BME Épületgépészeti és Gépészeti Eljárás-technika Tanszéken a WinWatt épületgépészeti méretező, tervező program mellett a Transient System Simulation Tool (TRNSYS) 2018-as verziója állt rendelkezésre, így ezt használtam a vizsgálatokhoz. A felsorolt energetikai méretező programok közül a WinWatt alkalmazása egy ismert, a hazai épületgépészeti mérnöki gyakorlatban jól elterjedt, gyors és felhasználóbarát számítási eljárást tesz lehetővé. A TRNSYS alkalmazása a hazánktól fejlettebb társadalmakban már egyre szélesebb körben terjed el, azonban hazánkban kevésbé ismert, és még kevésbé terjedt el, amelynek részben oka az említett dinamikus energia szimulációs szoftver magas beruházási beszerzési költsége. Az épületenergetikai témakörben benyújtott OTKA (támogató: NKFIH, az. szám: 115614) kutatási pályázat keretein belül sikerült beszerezni az épületenergetikai dinamikus szimulációs vizsgálatokra is alkalmas TRNSYS programot. A kutatómunkában segített *Kopány Attila* Bsc hallgató, munkájából egy kiváló minőségű szakdolgozat született [8].

A WinWatt program által biztosított számítási módszereket a cikkben nem részletezem, annak használata már jól ismert a gyakorlatban dolgozó tervező és szakértéssel foglalkozó épületgépész és épületenergetikai mérnökök számára. Ebben a cikkben a TRNSYS által nyújtott számítási eljárásokat mutatom be és összehasonlítom a 7/2006. (V. 24.) TNM rendelet nyújtotta méretező eljárással (WinWatt) egy családi ház fűtési rendszerének modellezése során, a gyakorlatban már elterjedt kondenzációs gázkazános és egyre szélesebb körben terjedő levegő-víz hőszivattyús fűtési rendszer között.

2. A TRNSYS számítási módszere

A TRNSYS és a hozzá hasonló dinamikus szimuláción alapuló szoftverek számítási módszere, valamint a magyar épületenergetikai rendelet (7/2006 TNM) által előírt módszer között sok alapvető különbség van. Saját tapasztalatom alapján az egyik legfontosabb, hogy a dinamikus szimulációt végrehajtó szoftverek használata esetén egy konkrét rendszert szükséges modellezni annak minden fontos elemével, törekedve a célnak megfelelő minél nagyobb pontosságra. Miután megtörtént a vizsgálandó rendszer modellezése, a szoftver a felhasználó által beállított időegységenként elvégzi az összes szükséges számítást a modellben fellelhető minden változó aktuális értékének felhasználásával a rendszer adott időponthoz tartozó állapotának meghatározásához.

¹ egyetemi docens

BME Épületgépészeti és Gépészeti Eljárás-technika Tanszék



Például egy fűtési rendszer energiafelhasználásának vizsgálata esetén a megfelelő pontosság elérése érdekében maximum 15 perc az az időintervallum, amely két számítás lefutása között a modellben eltelik. Ez szemléletesen azt jelenti, hogy egy egész évre érvényes számítás esetén a program az általa felhasznált, január 1. 0 óra 0 perc időponthoz tartozó időjárási és környezeti adatokat – illetve minden más szükséges bemenetet, például fűtési vízhőmérsékletet, tömegáramot – feldolgozva kiszámítja a rendszer állapotát, vagyis értékeket határoz meg minden, a modellben fellelhető elem kimenetére: így például esetünkben egy családi ház belső hőmérsékletére, vagy a kazán energiafelhasználására, majd ugyanezeket a számításokat elvégzi a 15 perccel későbbi időponthoz tartozó időjárási – és más – adatok felhasználásával. Ezeket a lépéseket tehát a szoftver minden negyedórán elvégzi, így az év 8760 órájában négy, azaz összesen 35040 értékhez jutunk az általunk modellezett rendszer minden változójáról. Elmondható tehát, hogy a dinamikus szimulációt végrehajtó szoftverek használatával nem csupán az egész évre vonatkozó fűtési energiafelhasználás értékét határozhatjuk meg, hanem sokkal részletesebb képet kaphatunk a rendszerünk egész éves működéséről [7-10].

Természetesen ezeknek az előnyöknek az ára többek között az, hogy egy ilyen, dinamikus szimulációt végezni képes modell felépítése adott esetben lényegesen több időt vesz igénybe, mint ha csupán a magyar épületenergetikai rendelet előírásai szerint számoló szoftvereket használnánk a munkánk során. Hozzá kell tennem, hogy ezt a hatást nagymértékben mérsékelni tudják a TRNSYS-hoz kapcsolódó, kiegészítő programok. Ilyen például a SketchUp 3 dimenziós tervezőszoftver, amelynek használatával felhasználóbarát, de mégis kellően pontos módon építhető fel a vizsgált épület 3 dimenziós modellje. Ez a modell ezután a TRNSYS által a továbbiakban felhasználható geometriai adatokká konvertálható a TRNBuild program segítségével. A SketchUp és a hozzá hasonló tervezőprogramok használatával jelentősen felgyorsítható a geometriai adatok megadása. Ez az a munkafázis, amely a legtöbb időt igényli a WinWatt szoftver használatának során, különösen kiterjedtebb geometriájú épületek esetén. Egy másik előnye a 3 dimenziós tervezőszoftverek használatának véleményem szerint az, hogy azzal, hogy a geometria láthatóvá válik a tervező számára, sokkal feltűnőbb lesz egy-egy elem hiánya, azaz kisebb valószínűséggel maradnak ki épületszerkezeti egységek a modellből.

Ezen előnyök mellett meg kell azonban említeni, hogy a tervező mérnökök számára hosszabb gyakorlati időt igényel mindezen szoftverek elsajátítása, ez pedig mindenképpen hátrány. Az a tény pedig, hogy egy építési projekt kezdeti szakaszában – például az engedélyeztetési eljárás során – még gyakran előfordul, hogy nem áll rendelkezésre kellő részletességgel minden, az épületenergetikai számításokhoz elengedhetetlen adat, illetve, hogy akár az épületgépészeti rendszerek is módosulnak még a projekt későbbi fázisai során, ugyancsak hátráltatja a dinamikus szimuláción alapuló számításokat, mivel az ilyen számításokhoz viszonylag részletes épületgépészeti modell felépítése szükséges.

Mindezeket a hátrányokat talán ellensúlyozza a dinamikus szimuláción alapuló számítás legnagyobb előnye, hogy pontosabb eredményekre tehetünk szert az alkalmazásával.

A 7/2006. TNM rendeletben szereplő, az épületenergetikai tervezés alapjául szolgáló adatok ugyan változnak – az energetikai szempontból különböző épületekre természetesen más és más előírások vonatkoznak – azonban csak a leggyakrabban előforduló befolyásoló tényezőket figyelembe véve (ilyen például az alapterület, vagy az, hogy a fűtött téren kívül vagy éppen belül helyezkedik el egy hőtermelő). Ennek következtében egyrészt előfordulhat az, hogy az általunk vizsgált épület bizonyos tulajdonságaira nincs a rendelet által megadott megfelelő adat. Másrészt, mivel nem lehetséges a táblázatokban minden, a gyakorlatban előforduló esetet megjeleníteni (erre példa lehet a 3. melléklet I.3. táblázata, ahol a sugárzási energiahozam, illetve az átlagintenzitás értékek csupán a négy fő égtájra vannak megadva, a köztes esetekre nem), szükségszerű, hogy gyakran csak két, a táblázatban megadott érték közötti interpolációval dolgozzon a tervező. Ez a helyzet például a hőeloszlás fajlagos veszteségeit leíró táblázatok esetében, ahol négy különböző hőfoklépcsőre szerepelnek adatok, köztes hőmérsékletek esetén pedig a közepes hőmérsékletkülönbségre viszonyított lineáris regresszióval kell meghatározni a veszteséget.

Mindazonáltal családi házak esetén elmondható, hogy a rendelet által megadott számítási módszerrel elfogadhatóan pontos eredményeket kaphatunk az épületek energiafogyasztására. A 7/2006. TNM rendelet tehát egy megfelelő – és a dinamikus szimulációnál jóval kisebb eszköz – a mérnökök számára. Ez alapján úgy gondolom, hogy nem lenne logikus csak szimulációhoz kötni a hazai épületek energetikai vizsgálatát – ez ugyanis olyan többletköltséget eredményezne (a szakemberek képzése, a szükséges számítógépes eszközigény révén), amelyet a gazdaság számára nem térítenének meg az így megkapható, kissé pontosabb eredmények.

Az általános bevezetés után a továbbiakban bemutatom, hogyan építettem fel a TRNSYS szoftverben az általam vizsgált fűtési rendszer modelljét, miközben kitérek a szoftver számítási módszerére is [7-10].

A TRNSYS szimulációinak alapja, hogy több önálló, úgynevezett komponens modellt, vagy típust kötünk össze, kialakítva a teljes modellt. A továbbiakban felváltva fogom használni a komponens, a komponens modell és a típus megnevezést, azonban mindhárom ugyanarra utal. Ezek a komponens modellek a szimulálandó rendszer egy-egy elemét képviselik (így például a szivattyúkat, csővezetéseket, napkollektorokat), és tartalmazzák ezen elemek viselkedését leíró egyenleteket.

Ezeknek az elemeknek az összekötése a TRNSYS-ban hasonló a valós rendszerekhez. A szoftver kernelje minden szimulációs időegység elején behívja az egyes típusok kódsorát, a TRNSYS-ban való megjelenésük sorrendjében. Ezután ellenőrzi az egyes típusok inputjait, illetve újra hívja azokat az inputokat, amelyek az előző szimulációs lépés óta megváltoztak. Ezt a lépést addig ismétli, míg az összes típus minden inputja többé már nem változik. Ezután a következő időegységre lép és előlről kezdi a lépések végrehajtását.

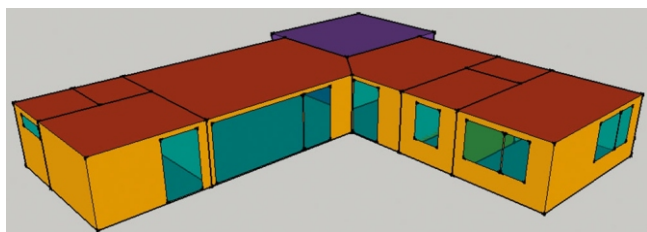
Fontos megjegyezni, hogy a szoftverben hogyan épülnek fel a komponens modellek, a TRNSYS ugyanis megkülönböztet időben nem változó és időben változó inputokat az egyes típusokra. Előbbieket paramétereknek hívjuk – ilyen lehet például egy hőtermelő névleges teljesítménye, vagy egy helyiség alapterülete. Az időben változó inputoknak nincs

külön megnevezése. Azt, hogy mik az adott komponens paraméterei és inputjai, az adott komponens modell fejlesztője dönti el, ezen a felhasználó nem változtathat [7-10].

A TRNSYS fő interfésze a Simulation Studio program. Ebben hozhatjuk létre új projektjeinket komponensek beillesztésével és összekötésével, illetve itt kezelhetjük az általános szimulációs beállításokat – mint például az időegység hosszát, vagy azt, hogy melyik időintervallumot vizsgáljuk. A Simulation Studio-ban történik a kimenetek kezelése is: itt állíthatjuk be, hogy mely kimenet értékeit mentjük el külső fájlba, vagy melyeket jelenítünk meg a képernyőn [10-13].

3. A többzónás épület komponens modell felépítése és működése

Az egyik legfontosabb komponens modell, amelyet a munkám során használtam, a többzónás épület komponens volt. Mivel ez a típus nagyon összetett, a Simulation Studio-ban való használata előtt egy különálló program, a TRNBuild segítségével kell beállítani a komponens tulajdonságait. A TRNBuild programban lehetőség van többek között az épület szerkezeteinek megadására is, amennyiben azonban ezek felépítését 3 dimenziós tervezőszoftverrel szeretnénk végezni, ezt még a TRNBuild használata előtt szükséges megtenni. Munkám során én ez utóbbi lehetőséget választottam. Az általam vizsgált családi ház 3 dimenziós építészeti geometriai modellezését a SketchUp program segítségével végeztem el a TRNSYS programcsomaggal történő kompatibilitási okokból kifolyólag. A program interfészében megjelenő, az általam vizsgált családi ház építészeti, geometriai modellje látható az 1. ábrán.



1. ábra. A vizsgált családi ház háromdimenziós építészeti modellje

Azért döntöttem a SketchUp program használata mellett, mert a segítségével gyorsan hozhatók létre és később egyszerűen módosíthatók az épületszerkezetek. A SketchUp felismeri, amennyiben a TRNSYS is telepítve van, és automatikusan felajánlja az úgynevezett TRNSYS termikus zónák létrehozásának lehetőségét.

A termikus zónák minden dinamikus szimulációt végrehajtó szoftverben kiemelkedően fontos szerepet töltenek be. Ugyanis ezek azok a különálló egységek, amelyekre az épületet felosztva hajtja véget a program a számításokat. A termikus zónák nem feltétlenül esnek teljes mértékben egybe az épület helyiségeivel. A szimuláció pontossága csupán azt kívánja meg, hogy egy-egy termikus zóna olyan tereket foglaljon magában, amelyek hasonló termikus viselkedésűek. Ennek megfelelően elégséges lehet akár egy egész emelet egy termikus zónába vétele is.

Fontos kiemelni azonban egy TRNSYS specifikus zóna tulajdonságot: ebben a szoftverben ugyanis csak konvex termikus zónák alakíthatók ki, azaz szemléletesen fogalmazva egy zóna minden oldalának látnia kell minden másik oldalt. E szabály miatt volt szükség arra, hogy a munkám során a vizsgált családi házat nyolc termikus zónára osszam. Egy ilyen kis épületnél kevesebb zóna alkalmazása is könnyen pontos lehetett volna. A nyolc termikus zónára történő osztással a családi ház szinte minden helyisége önálló zónát alkot, így lehetőség van ezek belső hőmérsékleteinek követésére a szimuláció egész időtartama alatt.

A SketchUp használatához fontos, hogy a tervezőprogram használata során csak úgy hozzunk létre geometriákat, hogy előzőleg beállítottuk a TRNSYS zóna használatát. E nélkül ugyanis a későbbiekben nem fogja tudni a TRNSYS felismerni az adott szerkezeteket. A SketchUp automatikusan tárítja az egyes épületszerkezetekhez azok funkcióját: felismeri a fűdémetek, külső és belső falakat, illetve a nyílászárókat is, így a 3 dimenziós épület-terveket a TRNBuild programba behívva további lépések nélkül állíthatók be a szerkezetek kiegészítő hőtechnikai tulajdonságai [7-10].

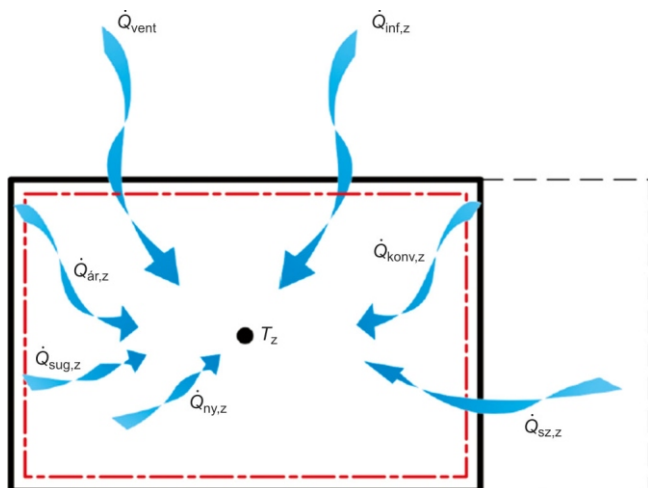
A TRNBuild szoftver segítségével hozhatók létre a Simulation Studio által is használható, többzónás épületet leíró fájlok. A SketchUp által létrehozott adatok behívása után a TRNBuildben megjelennek az általunk létrehozott szerkezetek és termikus zónák, amelyekhez további fontos tulajdonságokat rendelhetünk hozzá. A WinWatt programhoz hasonlóan az egyes épületszerkezetek esetén megadhatjuk azok rétegrendjét, a program által felkínált anyaglistából választva, de lehetőség van saját magunk által definiált anyagok létrehozására is. Utóbbi esetben a használni kívánt anyag fajlagos hővezető képességét, a fajhőjét illetve a sűrűségét szükséges megadni. Az egyes zónák esetében lehetőség van fűtés és hűtés beállítására is, ez azonban nem egy épületgépészeti rendszer részletes meghatározását jelenti, csupán az modellezhető ezzel, hogy adott belső hőmérséklet tartása a zónában mennyi energiát igényel. A termikus zónákhoz megadhatók szellőzési és infiltrációs légcsereszámok, illetve különböző belső nyereségek is.

Véleményem szerint a TRNBuild szoftver nagyon hasznos funkciója, hogy a fentiekben felsorolt minden elem definiálható inputként is. Ebben az esetben a Simulation Studio-ban a többzónás épület komponens modell input listájához újabban adódnak hozzá. Ez a lehetőség azért hasznos, mert egy-egy ilyen bemenetet a Simulation Studio-ban adott esetben több lehetőségünk van definiálni, hiszen itt már a modell többi komponensét (például az időjárási adatokat, vagy az épületgépészeti rendszer elemeit) is felhasználhatjuk. Így például arra a problémára, hogy milyen hőmérsékletet adjunk meg az infiltráció során bejutó levegőre, egyszerű megoldást nyújt az a lehetőség, hogy a hőmérsékletet egy inputként definiáljuk, ehhez pedig a Simulation Studioban rendeljük hozzá (az időjárási adatokat tartalmazó komponens és a többzónás épület komponensét összekötve) a külső légállapotot jellemző meteorológiai adatbázist.

A TRNBuild szoftverben a rétegrendek megadásakor lehetőség van egy úgynevezett aktív réteg definiálására is. Ezzel tudjuk megadni a padlófűtést (vagy más felületfűtést) tartalmazó épületszerkezeteket: beállítható mind a csőátmérő, mind

a fektetési köz. A padlófűtéssel a termikus zónába érkező hőáram értéke, illetve a padló felületének hőmérséklete is beállítható, illetve ezek az értékek egy később definiálásra kerülő inputként is megadhatók [10-13].

A többzónás épület komponens alapja egy energia-egyensúly modell. Egy termikus zónába érkező lehetséges hőáramokat szemléltet a **2. ábra**.



2. ábra. A termikus zóna hőegyensúlya a TRNSYS-ban

A zónába érkező hőáramot a TRNSYS szoftver az (1) összefüggésből kiindulva határozza meg:

$$\dot{Q}_z = \dot{Q}_{konv,z} + \dot{Q}_{inf,z} + \dot{Q}_{szell,z} + \dot{Q}_{ny,z} + \dot{Q}_{sz,z} + \dot{Q}_{sug,z} + \dot{Q}_{ar,z} \quad (1)$$

ahol

\dot{Q}_z – a zónába érkező hőáram, W

$\dot{Q}_{konv,z}$ – a zónát határoló felületek felől konvektív módon érkező hőáramok, W

$\dot{Q}_{inf,z} = \dot{V}_{inf,k} c_{p,k} (t_k - t_b)$ – a zónába a környezet felől érkező infiltrációs hőáramok W, ahol \dot{V}_{inf} az infiltrációs térfogatáram, k a külső levegő sűrűsége, $c_{p,k}$ a külső levegő fajhője, t_k a külső levegő hőmérséklete,

$\dot{Q}_{szell,z} = \dot{V}_{szell,szell} c_{p,szell} (t_{szell} - t_b)$ – a zónába a szellőző rendszer által érkező hőáramok W, ahol \dot{V}_{szell} a szellőző rendszer térfogatárama, $szell$ a szellőző levegő sűrűsége, $c_{p,szell}$ a szellőző levegő fajhője, t_{szell} a szellőző levegő hőmérséklete,

$\dot{Q}_{ny,z}$ – konvektív hőáramok a zónában jelen lévő forrásokból, W

$\dot{Q}_{sz,z} = \dot{V}_{sz,sz} c_{p,sz} (t_{sz} - t_b)$ – a szomszédos zónából levegő útján érkező hőáramok W, ahol \dot{V}_{sz} a szomszédos zónából érkező térfogatáram, sz a szomszédos zóna levegőjének sűrűsége, $c_{p,sz}$ a szomszédos zóna levegőjének fajhője, t_{sz} a szomszédos zóna levegőjének hőmérséklete,

$\dot{Q}_{sug,z}$ – a külső ablakok felől a zónába érkező napsugárzás, amely a zónába lépve a belső levegő konvektív nyereségévé válik, W

$\dot{Q}_{ar,z}$ – a belső árnyékolók által abszorbeált napsugárzás, amely a belső levegő konvektív nyereségévé válik, W.

A fentebb felsorolt hőáramokon kívül lehetőség van további nyereségek definiálására is, ahogyan azt a TRNBuild szoftver használatának leírásakor említettem.

A \dot{Q}_z meghatározásának célja, hogy kiszámíthatóvá váljon a zóna hőmérsékletének megváltozása. Ehhez a (2) összefüggésből indul ki a TRNSYS:

$$C_z \frac{d}{dt} T_z = \dot{Q}_z \quad (2)$$

ahol C_z a termikus zóna hőkapacitása. Az egyenletek egyszerűsítése érdekében \dot{Q}_z értékét egy szimulációs időintervallumon belül állandónak vesszük. Ebben az esetben az időintervallum végén a zóna hőmérséklete a (3) összefüggéssel számítható:

$$T_{z,t} = T_{z,t-1} + \frac{\dot{Q}_z}{C_z} \Delta t \quad (3)$$

ahol Δt a szimulációs időintervallum, $T_{z,t-1}$ a zóna hőmérséklete az időintervallum kezdetén [13].

3.1 A gázkazános berendezés szimulációs modelljének felépítése és működése

Az általam vizsgálni kívánt első fűtési rendszer hőtermelője egy kondenzációs gázkazán, amely egy padlófűtési rendszert lát el melegvízzel. A hőtermelő modellezéséhez a TRNSYS 122-es számú komponens típusát használtam. Ez a típus egy egyszerű, melegvizet előállító kazánt modellez. A működéséhez meg kell adni a kazán névleges teljesítményét (ebben az esetben ez az érték a hőhordozónak átadott teljesítményre vonatkozik), a kazánba érkező fűtőközeg fajhőjét, illetve azt a legkisebb részteljesítményt, amelyre a kazán lemodulálni képes. A fűtőközeg belépő hőmérséklete és tömegárama, a kazán összhatásfoka és tüzeléstechnikai hatásfoka, a kívánt előremenő hőmérséklet, illetve a kontrol jel inputként állítandó be. Amennyiben a kazán kontrol jelének értéke 1, úgy teljes teljesítményen működik, ha 1 és 0 közé esik az értéke, úgy részteljesítményen, ha értéke 0, a kazán nem működik [9-14].

A szoftver ezekből a bemenő adatokból számítja a kimenő hőmérsékletet és a tömegáramot, a hőhordozó közegnek átadott teljesítményt, a kazán hőveszteségeit a környezet felé, illetve a kazánba a tüzelőanyaggal bevinni szükséges teljesítményt. Az utóbbi két mutató meghatározásához a modell egyszerű hatásfok-összefüggéseket használ. Abban az esetben, ha nem érzékel semmilyen közeg a kazánba, a komponens a kilépő tömegáram értékét zérusra állítja, a kilépő közeg hőmérsékletét a belépővel teszi egyenlővé, a közegnek átadott teljesítményt, a veszteségek és a bevinni szükséges teljesítmény értékét szintén nullával teszi egyenlővé, a kontrol jel értékétől függetlenül. Amennyiben a kazánba érzékel tömegáram, de a kontrol jelének értéke nulla, azaz a kazán kikapcsolt állapotban van, akkor e jellemzők értékét szintén nullával teszi egyenlővé, a kilépő közeg hőmérséklete pedig hasonlóan megegyezik a belépő közegével. Akkor viszont, ha a kazánba

belépő tömegáram értéke nem zérus, illetve a kontrol jel értéke 1, a modell először meghatározza a kívánt előremenő hőmérséklet eléréséhez a közegnek átadni szükséges teljesítményt a (4) összefüggéssel:

$$\dot{Q}_{\text{közeg}} = \dot{m}_{\text{közeg}} c_{p, \text{közeg}} (T_e - T_{be}), \quad (4)$$

ahol

$\dot{Q}_{\text{közeg}}$ – a közegnek átadni szükséges teljesítmény, W,
 $\dot{m}_{\text{közeg}}$ – a közeg tömegárama, kg/s,
 $c_{p, \text{közeg}}$ – a fűtőközeg fajhője, J/kg/K,
 T_e – a beállított előremenő hőmérséklet, °C,
 T_{be} – a közeg hőmérséklete a kazánba lépéskor, °C.

A $\dot{Q}_{\text{közeg}}$ minimális értéke nulla (azaz nem számol negatív teljesítményt a modell abban az esetben, ha a belépő közeg hőmérséklet nagyobb az előremenőnél), maximális értéke pedig a kazán beállított névleges teljesítménye. Amennyiben $\dot{Q}_{\text{közeg}}$ értéke kisebb vagy egyenlő, mint a kazán névleges teljesítménye, akkor a közegnek átadott teljesítmény értékét a típus egyenlővé teszi $\dot{Q}_{\text{közeg}}$ értékével, az előremenő hőmérsékletet pedig a beállított értékre állítja. Abban az esetben viszont, ha a szükséges teljesítmény meghaladja a kazán névleges teljesítményét, a közegnek átadott teljesítményt a névleges teljesítménnyel teszi egyenlővé a modell, a kilépő közeg hőmérsékletét pedig az (5) összefüggéssel határozza meg:

$$T_e - T_{be} = \frac{\dot{Q}_{\text{max}}}{\dot{m}_{\text{közeg}} c_{p, \text{közeg}}}, \quad (5)$$

ahol \dot{Q}_{max} – a kazán névleges teljesítménye, W.

Miután meghatározásra került a közegnek átadott teljesítmény, a kazánba bevezetni szükséges teljesítmény a (6) összefüggés szerint határozható meg:

$$\dot{Q}_{be} = \frac{\dot{Q}_{\text{közeg}}}{\eta_k}, \quad (6)$$

ahol \dot{Q}_{be} – a kazánba a tüzelőanyaggal bevezetni szükséges teljesítmény, W,
 η_k – a kazán hatásfoka, –.

3.2 A levegő-víz hőszivattyús berendezés szimulációs modellezése

A TRNSYS kiegészítő komponens modell-csomagjának használatával lehetőségünk van levegő-víz hőszivattyúk vizsgálatára is. A program két típusú levegő-víz hőszivattyút is megkülönböztet: a 917-es számú típussal meghatározható a forrásoldali levegő páratartalmának változása is, míg a valamivel egyszerűbb 941-es komponens nem számol ezekkel a változásokkal. A részletesebb típus alkalmazása abban az esetben lehet indokolt, ha az elpárolgatóból távozó levegő valamilyen belső térbe jut – ekkor fontos lehet számunkra, hogy ismerjük annak páratartalom változását. Az általam elvégzett vizsgálatban azonban a hőszivattyú elpárolgatója a kültérben található, külső levegőt szív be és azt a kültérbe is engedi, így annak páratartalom változása nem fontos a modell szempontjából, ezért én az utóbbi komponenset választottam.

A levegő-víz hőszivattyú modell talán leglényegesebb elemei a teljesítmény adatokat tartalmazó fájlok. Ezekben található meg a hőszivattyú fűtési teljesítményének, illetve áramfelvételének változásai különböző visszatérő vízhőmérsékletek és az elpárolgatóba belépő különböző levegő hőmérsékletek esetén. Külön szövegfájl vonatkozik a fűtési módra illetve a hűtésre. Az egyes fájlokban az adatok névleges teljesítménnyel és áramfelvétellel normált alakjai szerepelnek, ami lehetővé teszi a modellben alkalmazandó hőszivattyú tulajdonságainak megváltoztatását a teljesítmény adatokat tartalmazó fájlok átírása nélkül [7-10].

A hőszivattyú fűtési módja esetén a kifejlesztett modell először meghatározza az aktuális külső hőmérséklethez és visszatérő hőmérséklethez – ezek szintén inputként állítandók be – tartozó teljesítményeket a teljesítmény fájlban megadott adatok között végzett interpolációval. Ezt követően a modell már számítani tudja az előremenő hőmérsékletet a (7) összefüggéssel:

$$T_e - T_v = \frac{\dot{Q}_{ft}}{\dot{m}_v c_{p, v}}, \quad (7)$$

ahol

T_e – az előremenő vízhőmérséklet, °C,
 T_v – a visszatérő vízhőmérséklet, °C,
 \dot{Q}_{ft} – a fűtővíznek átadott teljesítmény, W,
 \dot{m}_v – a keringetett fűtési víz tömegárama, kg/s,
 $c_{p, v}$ – a fűtési víz fajhője, J/kg/K.

A következő lépésben a komponens modell meghatározza a kondenzátor és az elpárolgató hőteljesítményét. A kompresszor teljesítményét úgy számítja ki a szoftver, hogy a teljesítmény fájlban megtalálható teljesítmény értékekből kivonja a ventilátor és a vezérlő által felvett villamos teljesítményt. A kondenzátor és az elpárolgató hőteljesítményei ezek alapján a (8) – (9) összefüggésekkel határozhatók meg:

$$\dot{Q}_{kond} = \dot{Q}_n - \dot{Q}_{ft}, \quad (8)$$

ahol

\dot{Q}_{kond} – a kondenzátor hőteljesítménye, W,
 \dot{Q}_n – a hőszivattyú fűtési teljesítménye, W, és

$$\dot{Q}_{elp} = \dot{Q}_{kond} - \dot{Q}_{ft} - P_{kompr}, \quad (9)$$

ahol

\dot{Q}_{elp} – az elpárolgató hőteljesítménye, W,
 P_{kompr} – a kompresszor teljesítménye, W.

Abban az esetben, ha a ráségítő fűtés is működik, az előremenő vízhőmérsékletet a (10) összefüggéssel határozza meg a modell:

$$T_e - T_v = \frac{\dot{Q}_{ft} + \dot{Q}_{kieg}}{\dot{m}_v c_{p, v}}, \quad (10)$$

ahol

\dot{Q}_{kieg} – a kiegészítő fűtés hőteljesítménye.

A hőszivattyú teljesítménytényezőjét pedig a következőképpen határozza meg a szoftver:

$$\text{COP}_{\text{hsz}} = \frac{\dot{Q}_{\text{ft}}}{P_{\text{kompr}}} \frac{\dot{Q}_{\text{kieg}}}{P_{\text{vent}} P_{\text{vez}} P_{\text{kieg}}}, \quad (11)$$

ahol

COP_{hsz} – a hőszivattyú teljesítménytényezője, – ,

P_{vent} – a ventilátor teljesítménye, W,

P_{vez} – a vezérlő teljesítménye, W,

P_{kieg} – a rásegítő fűtés felvett villamos teljesítménye, W.

3.3 A padlófűtés szimulációs modellezése

A padlófűtési rendszer modellezéséhez a TRNSYS TESS könyvtárából több típus is alkalmazható, a következőkben én az egyszerű padlófűtési modell működésének leírását adom meg. E komponens működése egyrészt azon a feltevésen alapszik, hogy a betonelem, amelyben a padlófűtés csővezetékei futnak, izotermikus testként modellezhető, azaz nincsenek hőmérséklet-gradiensek a fűtőbetonon belül. Ez a közelítés elfogadható pontosságú, amennyiben a beton hővezetési ellenállása kellően nagy ahhoz képest, hogy milyen teljesítménnyel adódik át a hő a felszínen a helyiség felé.

A másik kiinduló feltevés, hogy a fűtőközeg és a fűtőbeton közti hőátadásra alkalmazhatók a hőcserélők hatásfokára vonatkozó összefüggések. A hőcserélő hatásfoka alatt ebben az esetben két közeg között ténylegesen fellépő hőcsere és a két közeg közötti maximális lehetséges hőcsere hányadosát értjük. E feltételek esetén a padlófűtés komponens modellje egy egyszerű, $dT/dt = aT + b$ alakú differenciálegyenlettel modellezhető matematikailag, ahol a és b konstansok. A padlófűtés esetében a két közeg, amely között ez az energiaáramlás felép, a víz és a beton, amely a padlófűtési csöveket körülveszi.

A legnagyobb hőcsere akkor menne végbe, ha a kilépő víz a beton hőmérsékletéig hűlné le, vagy ha a beton hőmérséklete a belépő víz hőmérsékletére nőne. A két közeg közül a kisebbik hőkapacitásának változik meg nagyobb mértékben a hőmérséklete. A kisebbik hőkapacitást a kettő közül a (12) összefüggéssel határozhatjuk meg:

$$C_{\min} = \min(m_b c_{p,b}), (\dot{m}_{f,k} c_{p,fk}) \quad (12)$$

ahol m_b – a fűtőbeton elem tömege, kg,

$c_{p,b}$ – a beton fajhője, J/kg/K,

$\dot{m}_{f,k}$ – a fűtőközeg tömegárama, kg/s,

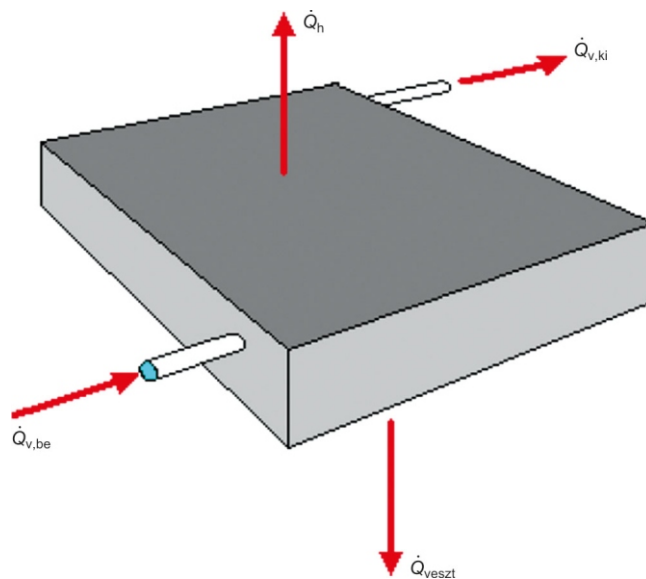
$c_{p,fk}$ – a fűtőközeg fajhője, J/kg/K.

A beton tömegének és fajhőjének a szorzata adja a beton tömb hőkapacitását, amelyet a padlófűtés komponens egy paramétereként kell megadni. A fűtőközeg és a padlófűtési elem energia-egyensúlyának vázlata a **3. ábrán** látható.

Az ábrában $\dot{Q}_{v,be}$ illetve $\dot{Q}_{v,ki}$ a fűtővízzel belépő illetve kilépő hőáram, \dot{Q}_h és \dot{Q}_{veszt} meghatározását pedig a (17)–(18) számú összefüggésekben közlöm.

Az energia egyensúlyt matematikailag a (13) összefüggés írja le:

$$m_b c_{p,b} \frac{dT_b}{dt} = U_f A_f (T_b - T_h) - U_a A_a (T_b - T_a) - C_{\min} (T_{be} - T_{ki}), \quad (13)$$



3. ábra. A padlófűtés modelljének energia-egyensúlya [10-13]

ahol

T_b – az izotermikusnak feltételezett fűtőbeton hőmérséklete, °C,

U_f – a betonelem és a helyiség közötti rétegek hővezetési tényezője, amely tartalmazza a hőátadási tényezőt is, W/m²/K,

U_a – a betonréteg és az alatta elhelyezkedő tér közötti hővezetési tényező, W/m²/K,

A_f és A_a – a betonelem felső és alsó felületének nagysága, m²,

T_h és T_a – a betonréteg feletti tér (a helyiség) és a betonréteg alatti tér hőmérséklete, °C,

– a fűtőközeg és a beton közti hőcsere hatásfoka, – ,

T_{be} és T_{ki} – a fűtőközeg be- illetve kilépő hőmérséklete, °C.

Mivel a fenti differenciálegyenlet $dT/dt = aT + b$ (ahol a és b konstansok) alakra hozható, a TRNSYS analitikusan meg tudja oldani azt, egy erre vonatkozó szubrutin behívásával. A padlófűtés modellje esetében az a és b konstansok a (14) – (15) összefüggésekkel határozhatók meg:

$$a = \frac{C_{\min} U_f A_f U_a A_a}{m_b c_{p,b}}, \quad (14)$$

$$b = C_{\min} \frac{T_{be}}{m_b c_{p,b}} - U_f A_f \frac{T_h}{m_b c_{p,b}} - U_a A_a \frac{T_a}{m_b c_{p,b}}. \quad (15)$$

A differenciálegyenlet megoldásával megkapjuk a betonréteg hőmérsékletét, ennek segítségével a komponens modell három hőáramot határoz meg: a fűtőközeg által a betonrétegnek átadott hőáramot, a beton elem és a helyiség közti hőteljesítményt, illetve a beton réteg és az alatta elhelyezkedő tér felé menő veszteség hőáramot. Ezeket a (16) – (18) összefüggésekkel számítja ki a program:

$$\dot{Q}_b = c_{p,b} (T_{be} - T_b), \quad (16)$$

ahol \dot{Q}_b – a fűtőközeg által a betonrétegnek átadott hőteljesítmény, W,

ahol \dot{Q}_h – a betonelem által a helyiségnek átadott
hőteljesítmény, W és

ahol \dot{Q}_{veszt} – a betonréteg által az alatta elhelyezkedő tér felé átadott hőteljesítmény, W [10-13].

Az utóbbi fejezetekben bemutatott komponensek alkotják a Simulation Studio programban felépített fűtési rendszer modellek fő elemeit. A következőkben bemutatom az általam felépített két fűtési rendszer modell főbb komponens kapcsolatait és jellegzetességeit. Az energiafelhasználás vizsgálatához azonban nem csupán a fűtési rendszerek felépítése volt a feladat, hanem ezeket az épület modelljével is össze kellett kapcsolni. Ez a két fűtési rendszer esetében nagyon hasonlóan történt: a TRNBuild szoftverben minden termikus zónában padlófűtést definiáltam, a padlófűtésből a zónába érkező nyereségek értékére pedig egy inputot hoztam létre. Ezekhez az inputokhoz kapcsoltam hozzá a Simulation Studio-ban a padlófűtési komponensek helyiség felé menő hőáram outputjait.

Az épülethez azonban nem csupán a fűtési rendszert volt szükséges hozzákapcsolni: a belső nyereségeket, a szellőző levegő tömegáramát, illetve a környezeti adatokat tartalmazó komponens megfelelő kimenetei is hozzá kellett kapcsolni az épület (előzőleg definiált) megfelelő bemeneteihez. Így többek között a környezeti hőmérséklethez és relatív páratartalomhoz a külső hőmérsékletet, illetve relatív páratartalmat, a szellőző levegő hőmérsékletéhez és páratartalmához szintén a külső hőmérsékletet és páratartalmat kapcsoltam hozzá. A szélső sebesség adatokból előbb külső hőátadási tényező értékeket

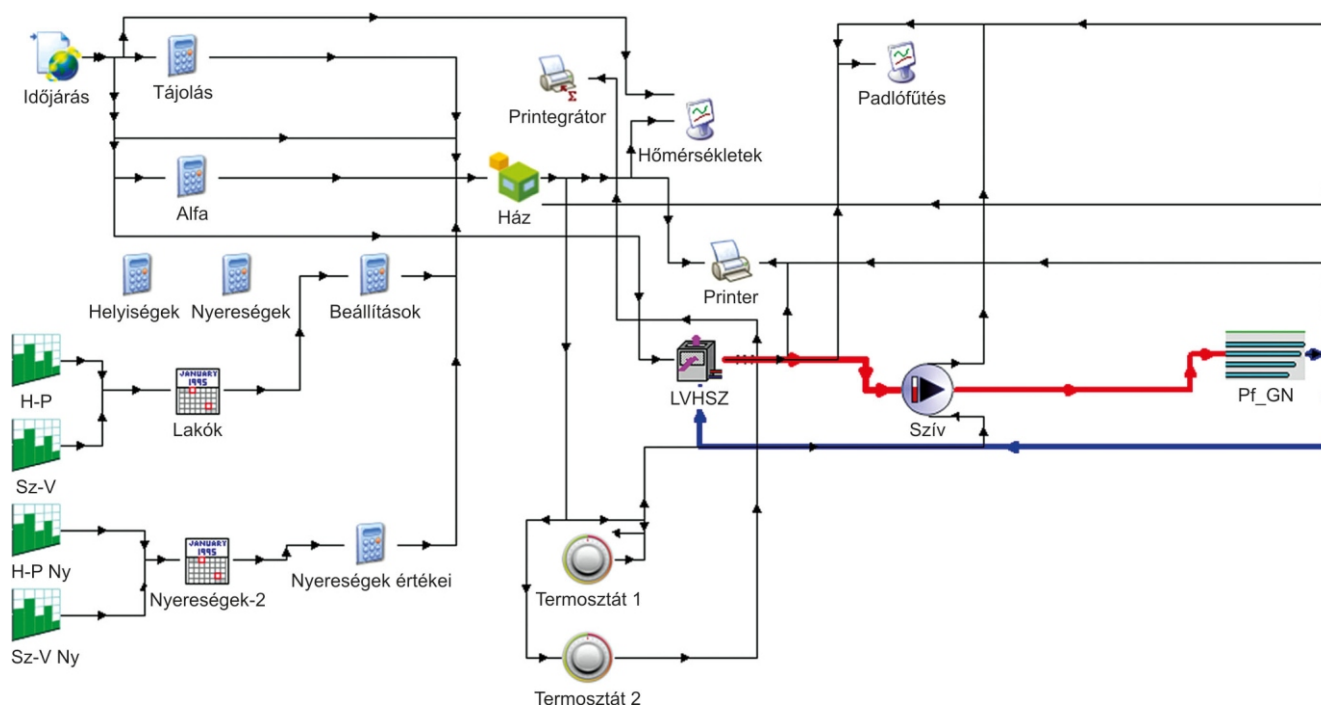
A kazánt tartalmazó fűtési rendszer felépítéséhez egy kazánból, szelepekből, szivattyúból, illetve a padlófűtési komponensből álló kört építettem fel. A kazánból kilépő fűtőközeghez a valóságosabb hőmérsékletértékekkel való működés céljából a visszatérő közegből a kilépő tömegáram háromszoros értékét kevertem hozzá. A keverőszelepből kilépő, csökkent hőmérsékletű víz ezután a szivattyúba jut, majd onnan a padlófűtési rendszerbe. A szivattyú komponens modell feladata a TRNSYS-ban csupán a tömegáram fenntartása, a program nem számol nyomáseloszlást a rendszerben és így a szivattyú fogyasztását sem számítja.

A szivattyú által felvett villamos teljesítményt saját adatokból kiindulva szükséges a szivattyú komponens paramétereként megadni. A padlófűtésből visszatérő víz az osztószelepbbe jut, innen a tömegáram negyede kerül a kazánba. Minden kapcsolat esetén az adott komponensek megfelelő belépő és kilépő közeg-tömegáram bemeneteit illetve kimeneteit kötöttem össze.

Fontos elem ezeken kívül a termosztát komponens, amely a nappali belső hőmérséklete alapján irányítja a kazán és a szivattyú indulását. Az előzőekben bemutatott komponenseken kívül ebben láthatóak az adatok kiírására és a szimuláció közben történő megmutatására szolgáló komponens modellek is. A gázkazános fűtési rendszer gépészeti modellje a **4. ábrán** látható.

A levegő-víz hőszivattyút tartalmazó fűtési rendszer felépítése a kazános rendszerhez nagyon hasonló. A főbb különbség, hogy ebben az esetben természetesen nincs visszakeverés, így valamelyest leegyszerűsödik a fűtési rendszer. Ezen kívül a hőszivattyú komponensét a kazánnal ellentétben további bemeneti adatokkal is el kell látni: az időjárás adatokat tartalmazó típust a hőszivattyúval összekapcsolva a külső hőmérséklet, a levegő relatív és abszolút páratartalmát is a





5. ábra. A levegő-víz hőszivattyús fűtési rendszer gépészeti modellezése a Simulation Studio programban

hőszivattyú komponens megfelelő bemeneteihez kell kötni. További különbség, hogy a hőszivattyú szabályozásához két termosztát komponensre is szükség van, ugyanis így valósítható meg a ráségítő fűtés külön jellel történő szabályozása. A WinWatt és a TRNSYS program használatával kiszámított eredményeim minél jobb összehasonlíthatósága érdekében a WinWatt szoftverben történő beállításhoz hasonlóan a TRNSYS használatakor is egy 4,3 COP értékű hőszivattyúból kiindulva számítottam a fűtési energiafelhasználást. A levegő-víz hőszivattyút tartalmazó rendszer felépítése a Simulation Studio-ban az **5. ábrán** látható.

A kutatás folytatásaként célom a TRNSYS szoftver felhasználásával a dinamikus szimuláció segítségével meghatározott, illetve a magyar rendelet szerinti számítási módszerrel dolgozó WinWatt program használatával kapott értékek összehasonlítása, elemzése.

Támogatók

Ez a kutatási munka a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatásával az NKFI Alapból [azonosítószám: NKFIH PD_18 127907] valósult meg, valamint a Magyar Tudományos Akadémia Bolyai János Kutatási Ösztöndíja és az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-18-4 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült, Budapest, Magyarország.

Felhasznált irodalom

- [1] 7/2006. (V. 24.) TNM Rendelet, elérhetőség: http://net.jogtar.hu/jr/gen/hjegy_doc.cgi?docid=A0600007. TNM., 2016.
- [2] Baumann Mihály, Épületenergetika, EDUTUS Főiskola: EDUTUS Főiskola, 2012.
- [3] Harmati NL, Folić RJ, Magyar Z, Energy performance modelling and heat recovery unit efficiency assessment of an office building Thermal Science, 19(3): 865-880, 2015.
- [4] Csoknyai T, Hrabovszky-Horváth S, Zdravko G, Milica J-P, Bojana S, Villatoro O, Szendrő G., Building stock characteristics and energy performance of residential buildings in Eastern-European countries Energy and Buildings, 132: 39-52., 2016.
- [5] Csoknyai Tamás és Zöld András, Épületenergetika TERC Kft., Budapest, 2013.
- [6] J.W. Mitchell, J.E. Braun, Design Analysis and Control of Space Conditioning Equipment and Systems University of Wisconsin, Madison, 1997.
- [7] Amir AS, Alan SF, Rakesh. Performance of two-stage variable capacity air source heat pump: Field performance results and TRNSYS simulation Energy and Buildings, 94: 80-90, 2015.
- [8] Kopányi Attila, Családi ház energetikai vizsgálata BSc szakdolgozat, BME Épületgépészeti és Gépészeti Eljárás-technika Tanszék, 2017.
- [9] Félix R-C, Carla M, Antonio C-M, José MC, Development and Experimental Validation of a TRNSYS Dynamic Tool for Design and Energy Optimization of Ground Source Heat Pump Systems. Energies, 10(10): 1510, 2017.
- [10] TRNSYS Tutorial, TESS Component Libraries, 2018.
- [11] TRNSYS Tutorial, Volume 1, Getting Started, 2018.
- [12] TRNSYS Tutorial, Volume 4, Mathematical Reference, 2018.
- [13] TRNSYS Tutorial, Multizone Building modelling, 2018.